

CBTC 시스템에서 무선통신 두절 시 이동 폐색 확장 방호 기능에 관한 연구

김형훈, 이종우*

서울과학기술대학교 철도전기신호공학과

A Study on the Protection Function by Expanding Moving Block against Wireless Communication Loss in CBTC System

Hyoung-Hoon Kim, Jong-Woo Lee*

Dept. of Railway Electrical Signaling Engineering, Seoul National University of Science and Technology

요약 통신 기반 열차 제어 시스템은 높은 수송력과 유지보수 효율성을 가지는 가장 진보된 시스템이다. 본 논문에서는 통신 기반 열차 제어 시스템에서 무선통신 두절이 발생할 경우 안전을 보장하는 방호 기능을 제안한다. 제안된 방호 기능은 무선통신 두절 시 이동 폐색 확장에 의한 방호이며, CBTC 기본 기능에서 통신 두절된 열차의 전방에 대한 안전을 보장하지 못하는 한계를 보완하는 방법이다. 시뮬레이션을 통해 CBTC 기본 기능과 비교하여 제안된 방호 방법이 통신 두절 시 열차를 안전하게 방호하는 방법임을 확인한다. 시뮬레이션 실험은 본선 승강장 진입, 본선 승강장 측선 진입, 기지 유치선 출고에 대해 수행하며, 열차 운행 중 진로 진입 전에 통신 두절을 발생시켜서 방호 기능을 확인한다. 시뮬레이션 실험 결과로 CBTC 기본 기능은 설정된 진로를 취소하고 대항 열차를 진입 시켜서 추돌 사고 가능성이 확인하며, 이동 폐색 확장 방호 기능은 설정된 진로를 취소할 수 없으므로 사고 가능성이 없음을 확인한다. 제안된 방호 기능이 향후 KTCS-M 표준에 적용되어 KTCS-M이 적용된 노선이 보다 높은 안전성을 확보하여 운영될 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract The communication-based train control system is the most advanced system with high transportation capacity and maintenance efficiency. This paper proposes a protection function that ensures safety in the event of wireless communication loss in a communication-based train control system. The proposed protection function offers protection by expanding the moving block in the event of a wireless communication loss, and is a method of complementing the limitations of the CBTC basic function that does not ensure safety for the front area of the train with communication loss. The simulation confirmed that the proposed protection method could safely protect the train in case of a communication loss by comparing it with the CBTC basic function. Simulation experiments were conducted on entry into the main line platform, entry into the side-line of the main line platform, and departure from the parking line in the depot. The protection function was confirmed by a communication loss before entering the route during normal train operation. The simulation experiment showed that the CBTC basic function checks the possibility of a collision accident by canceling the set route and allowing the opposing train to enter, and the protection function by expanding the moving block to check that there is no possibility of an accident because the set route cannot be canceled. The proposed protection function can be applied to the KTCS-M standard in the future so that KTCS-M applied lines can operate with higher safety.

Keywords : ATP, CBTC, Communication Loss, Expansion, KTCS-M, Moving Block, Protection

*Corresponding Author : Jong-Woo Lee(Soonchunhyang Univ.)

email: chaelinge@gmail.com

Received April 16, 2024

Revised May 2, 2024

Accepted May 3, 2024

Published May 31, 2024

1. 서론

통신 기반 열차 제어(CBTC: Communication Based Train Control) 시스템[1]은 기존 궤도 회로 기반 열차 제어 시스템에 비해 높은 수용력과 유지보수 효율성을 가지는 가장 진보된 열차 제어 시스템이다. 국내의 많은 사이트에서 통신 기반 열차제어 시스템을 채택하고 있으며, 국내의 경우 CBTC의 국산 표준인 KTCS-M(Korean Train Control System - Metro)[2]이 서울 신림경전철을 비롯하여 여러 사이트에 적용되고 있다.

CBTC 시스템은 기존 신호 시스템보다 사람의 실수에 의한 위험측 발생 가능성을 줄였으나, 통신의 한계에 의해 발생할 수 있는 사고 가능성이 존재한다. CBTC 시스템은 무선통신 두절 시 실제 열차의 정확한 위치를 알 수 없다[3-14].

기본적인 CBTC 시스템은 통신이 두절되기 직전의 유효한 열차 위치를 유지하기 때문에, 통신 두절로 인해 유효하지 않은 열차 위치가 된 순간부터 후속 열차의 접근에 대해서는 방호하는 것이 가능하지만 전방 열차의 접근에 대해서는 정확하게 방호하는 것이 불가능하다. 따라서, 무선통신 두절 시 열차의 추돌을 방지하기 위한 새로운 방호 기능에 대한 연구가 필요하다.

본 논문에서는 무선통신 두절 방호 기능으로 이동 폐색 확장 방호 기능을 제안한다. 제안된 방법은 통신 두절 시간과 열차의 속도를 고려하여 안전을 보장하면서 최소한의 폐색 영역 확장을 수행한다. 이러한 폐색 확장 방호를 통해 CBTC 기본 기능의 통신 두절 방호의 운영적 한계를 해결할 수 있다. CBTC 시뮬레이터 기반의 시뮬레이션을 통해 CBTC 기본 기능 방호와 비교하여 제안된 방호 기능이 통신 두절 상황에서 운영자의 조작 실수를 예방함으로써 더욱 안전하게 열차를 방호함을 확인하였다.

2. 기존 CBTC 방호 기능 한계

2.1 CBTC 방호 기능

Fig. 1과 같이, CBTC 시스템은 자동 열차 감시(ATS: Automatic Train Supervision) 장치, 자동 열차 방호(ATP: Automatic Train Protection) 장치, 전자연동(CBI: Computer Based Interlocking) 장치, 데이터 통신 장치(DTS: Data Transmission System)로 구성된다.

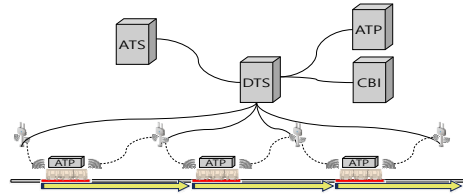


Fig. 1. Configuration of CBTC system

이동 폐색(Moving block)[15-19]은 열차가 한 대만 들어갈 수 있는 공간인 폐색이 열차의 주행 속도와 위치에 따라 폐색의 크기와 위치가 변동하는 것을 의미한다. 이동 폐색은 Fig. 2와 같이 최소 안전 후두부(MSRE: Minimum safe rear end)와 최대 안전 전두부(MSFE: Maximum safe front end) 사이 구간을 의미한다. 이동 폐색은 기준 태그 그룹(LRTG: Last Reported Tag Group)으로부터 추정하는 열차 전두부(Estimated front end)까지 거리(Distance of train movement)를 기준으로 열차 길이(Train length)와 위치 계산의 오차(Doubt over, Doubt under)를 포함하여 결정한다.

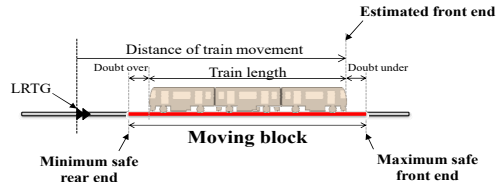


Fig. 2. Moving block

이동 권한(MA: Movement authority)[17,20]은 이동 폐색을 포함하여 열차가 진행하는 방향으로 안전하게 이동할 수 있는 거리의 한계이다. Fig. 3과 같이, MA 한계는 선행 열차의 MSRE, 진로 조건, 방호 구간 정보 등을 토대로 더 단축되거나 확장되게 결정된다.

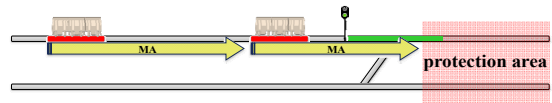


Fig. 3. Movement authority

CBTC 시스템에서, ATP 장치[21,22]는 상기와 같이 이동 폐색과 이동 권한을 생성하고 관리하여 안전한 열차 운영을 보장한다. ATP 장치는 어떤 다른 열차도 결정된 이동 폐색과 이동 권한을 침범할 수 없도록 관리하며, 열차는 결정된 자신의 이동 권한 내에서만 이동하도록 관리한다.

2.2 무선통신 두절 시 방호 기능 한계

CBTC 시스템에서 무선통신이 두절되면, 가장 마지막에 수신한 열차 위치 정보를 기반으로 결정된 이동 폐색이 유지된다. Fig. 4와 같이, CBTC 기본 기능에 의한 방호에 의해 ATP 장치는 무선통신이 두절된 열차의 이동 폐색을 유지하지만, 해당 열차의 실제 위치는 이동 방향 전방으로 더 나아간 위치에 정착한다. 즉, 이동 폐색으로 후속 열차를 더 안전하게 방호하지만, 더 나아간 위치에 정착한 실제 열차의 위치는 정확하게 모르기 때문에 실제 열차를 방호하는 것은 불가능하다.

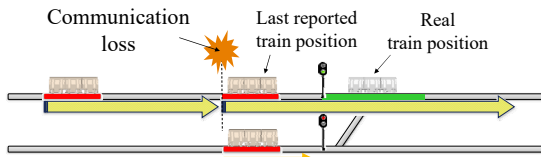


Fig. 4. Protection by basic function

Fig. 5는 CBTC 시스템 기본 기능으로 통신 두절 시 열차 전방의 안전을 확보할 수 없는 상황을 보여준다. CBTC 시스템은 통신이 두절된 열차의 마지막에 보고된 열차 위치(Last reported train position)를 유지하며, 실제 열차 위치(Real train position)를 인식하지 못한 상태이므로, 운영자의 실수로 하선 열차를 상선으로 이동시키기 위해 진로를 설정하고 하선 열차를 이동시키는 경우, 상선의 통신이 두절된 열차와 하선의 상선 이동 열차는 충돌하게 된다.

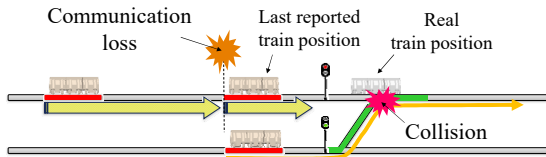


Fig. 5. Possibility of train collision due to operator error when protecting basic functions of CBTC

따라서 CBTC 시스템을 보다 더 안전하게 사용하기 위해서 본 논문에서 제안하는 무선통신 두절 방호를 위한 방호 구간 설정 방호 방법과 이동 폐색 확장 방호 방법의 적용이 필요하다.

CBTC 시스템 기본 기능 방호에 의한 통신 두절 방호 길이(D_p)는 Eq. (1)과 같다. Fig. 6과 같이, $D_{protection}$ 은 통신 두절 시점(T_d)부터 이동 권한 길이(D_{MA})와 동일하

며, 이동 폐색 길이(D_{MB})는 확장하지 않는다.

$$D_p = D_{MA} \quad (1)$$

where, D_p denotes length of protection for communication loss, D_{MA} denotes length of MA

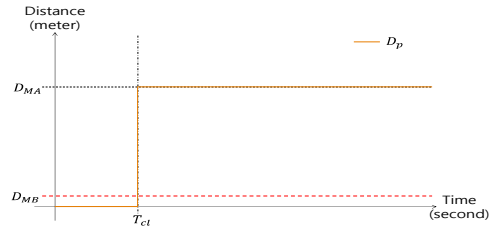


Fig. 6. Protection distance over time by protecting basic functions of CBTC

3. 이동 폐색 확장 방호

제안하는 이동 폐색 확장 방호 기능은 이동 폐색이 열차가 한 대만 존재할 수 있는 공간으로 절대적인 안전이 보장된다는 점을 이용한다. 최대 이동 폐색 확장에 의한 방호는 통신 두절을 판단한 열차에 대해 통신 두절 시간 동안 열차의 성능 최대 속도로 열차가 이동했다고 가정하고 이동 폐색을 증가시켜서 방호하는 방법이다.

Fig. 7과 같이, 제안된 방법은 무선통신 두절을 판단한 시점에 무선통신 두절 시점부터 무선통신 두절을 판단하는 시간 동안 열차 성능 최대 속도로 열차가 이동한 것으로 가정하여 이동 폐색을 확장(D_1) 시키며, 무선통신 두절을 판단한 시점부터 ATP 통신 주기마다 열차 성능 최대 속도로 열차가 이동한 것으로 가정하여 이동 폐색을 점진적으로 확장(D_2) 시킨다. 이러한 점진적인 이동 폐색 확장은 이동 권한의 끝까지로 제한한다.

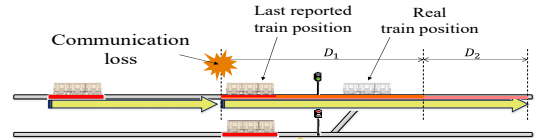


Fig. 7. Protection by maximum moving block extension

Fig. 8과 같이, 이동 폐색 확장 방호 길이(D_p)는 Eq. (3) 과 같이 통신이 두절되기 시작한 시점부터 통신 두절을 판단한 시간까지의 통신 두절 시간(T_d) 동안 최대 열

차 성능 속도(V_{max})로 열차가 이동한 거리(D_1)와 Eq. (4) 와 같이 통신 두절을 판단한 시간 이후부터 ATP 통신 주기 단위(T_{cc}) 최대 열차 성능 속도로 열차가 이동한 누적 거리를 합한 거리(D_2)이다. 따라서 통신 두절 상태가 지속되면 이동 폐색 길이(D_{MB})는 T_d 시점에 D_1 과 같게 최초로 확장하며, T_{cc} 단위로 시간이 경과하면서 D_2 와 같이 최대로 확장하여 이동 권한 길이(D_{MA})와 같게 된다.

$$D_p = D_1 + D_2 \leq D_{MA} \quad (2)$$

where, D_1 denotes distance traveled at maximum train performance speed from start of communication loss to determination of communication loss, D_2 denotes cumulative distance traveled at maximum train performance speed per communication cycle of ATP after determination of communication loss

$$D_1 = V_{max} \times T_d \quad (3)$$

where, V_{max} denotes maximum train performance speed, T_d denotes communication loss time

$$D_2 = \sum (V_{max} \times T_{cc}) \quad (4)$$

where, T_{cc} denotes communication cycle of ATP

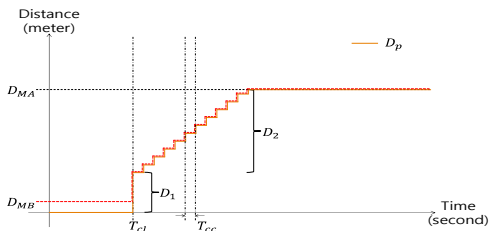


Fig. 8. Protection distance over time by moving block extension

따라서 제안하는 이동 폐색 확장 방호는 열차가 존재할 수 있는 공간을 이동 폐색으로 확장하여 철사 채정에 의해 제어 불가능한 안전한 공간을 확보하므로, CBTC 시스템 기본 기능에 의한 방호의 불확실한 열차 위치로 인한 운영자 실수에 의한 사고 가능성을 사전에 방지할 수 있는 안전한 방호 기능이다.

4. 실험 및 고찰

4.1 시뮬레이션 환경

시뮬레이션 실험을 통해 제안된 이동 폐색 확장 방호의 성능을 확인한다. ATP 장치에 CBTC 기본 기능으로만 구성된 것과 이동 폐색 확장 방호 기능을 추가 보완한 것을 각각 시뮬레이션하여 운영자 실수로 인한 사고가 발생하는지 여부를 확인한다.

Fig. 9는 CBTC 시스템을 보여준다. 관제 ATS 장치는 노선의 선로와 열차의 상태를 감시하고 제어한다. 지상 ATP 장치는 관할 영역의 열차들과 연계하여 열차 운행을 방호한다. 전자 연동 장치는 관할 영역의 선로 장치들을 연계하여 열차 운행을 방호한다. 차상 ATP 장치는 열차의 운행을 안전하게 방호한다. 그리고 네트워크 장치는 이들 간의 통신을 담당한다.

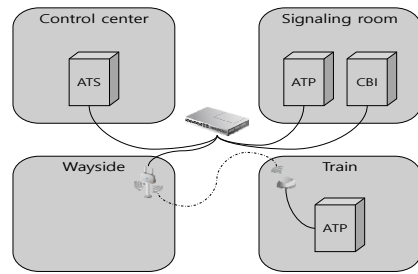


Fig. 9. CBTC system configuration

시뮬레이션 환경은 Fig. 10과 같이 지상 ATP 장치, 차상 ATP 장치, 관제 ATS 장치와 전자 연동 장치 역할을 하는 지상 시뮬레이터, 열차 역할을 하는 차상 시뮬레이터 구성하였다. 실제 CBTC로 운영 중인 신림경전철 선로 환경을 대상으로 시뮬레이션을 구성하여 수행한다. 선로 최고 속도는 60km/h이며, 최대 열차 성능 속도는 70km/h이다.

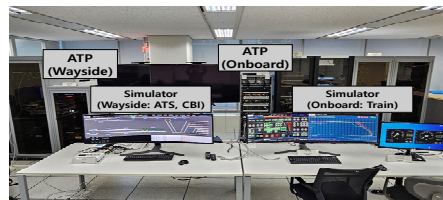


Fig. 10. Configuration for simulation

4.2 시뮬레이션 결과

신림경전철 노선에서 대부분의 철도 선로 환경을 대표

할 수 있는 본선 승강장 진입, 본선 승강장 측선 진입, 기지 유치선 출고의 3종류의 시나리오로 실험하였다. 시물레이션에서 열차 위치는 전두부를 기준으로 하며, (LRTG, 거리(m))로 표현한다.

첫 번째 시나리오인 본선 승강장 진입은 열차를 직선 진로로 최대 속도로 운영할 수 있는 본선 111역을 대상으로 선정하였다. 통신 두절 시험 열차를 111역 상선에 생성하고 이동시켜서 111역 상선 승강장 진입 진로 전의 위치에서 통신 두절을 발생시킨다. 이때 ATP의 무선 통신 두절 안전측 제동으로 정차한 열차에 대해 CBTC 기본 기능의 ATP는 운영의 실수에 의해 사고가 발생할 수 있으며, 이동 폐색 확장 방호 기능이 추가된 ATP는 상기 사고 발생 가능성을 예방할 수 있음을 확인한다.

Fig. 11은 시물레이션을 시작하기 위한 시물레이터들의 초기 설정화면을 보여준다. Fig. 11(a) 열차 시물레이터에서 통신 두절 시험 열차를 생성하고, Fig. 11(b) 지상 시물레이터 화면에서 열차가 생성(1101, 21.423m)된 것을 확인한다.

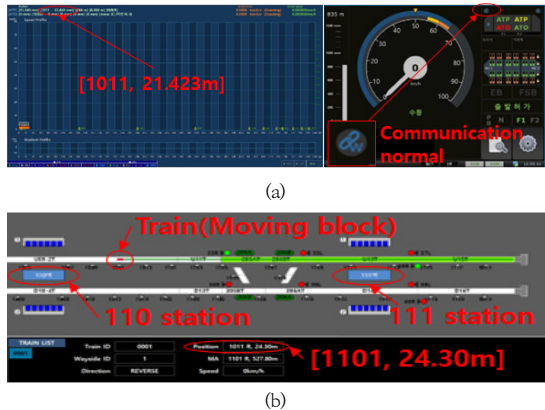


Fig. 11. Start in the first simulation;
(a) Train simulator (b) Wayside simulator

Fig. 12는 생성한 시험 열차를 111역 상선 승강장으로 출발시키고 111역 상선 승강장 진입 진로 전에 통신 두절을 발생시킨 결과이다. Fig. 12(a) 열차 시물레이터는 ATP의 통신 두절 안전측 제동 제어에 의해 111역 상선 진로 내의 위치(1107, 33.852m)에서 정차한 것을 보여준다. Fig. 12(b) 지상 시물레이터 화면은 111역 상선 진입 진로 전 위치(1101, 173.9m)에서 59km/h 속도로 주행 중에 통신 두절을 만들어서 열차 상태가 정지한 것으로 표시된 것이다.

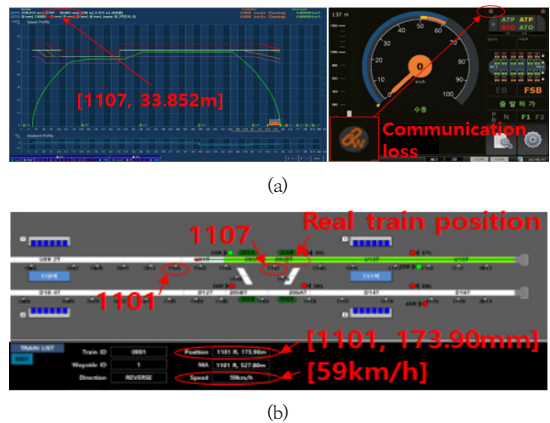
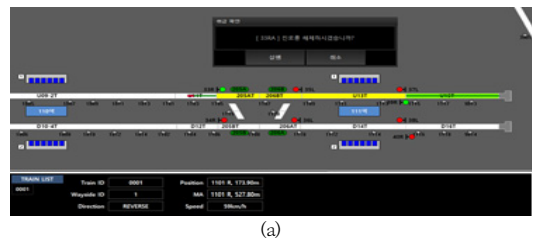


Fig. 12. Communication loss in the first simulation;
(a) Train simulator (b) Wayside simulator

Fig. 13은 CBTC 기본 기능에서 통신 두절 방호의 한계를 보여준다. Fig. 13(a)는 지상 시물레이터에서 111역 상선 승강장 진입 진로를 해제 제어하는 화면이다. Fig. 13(b) 지상 시물레이터 화면은 111역 상선 승강장 진입 진로가 해제되었음을 보여준다. Fig. 13(c)는 지상 시물레이터에서 111역 하선에서 111역 상선 승강장 진입 진로를 설정 제어하는 화면이다. Fig. 13(d) 지상 시물레이터 화면은 Fig. 13(c)에서 제어한 결과로 진로가 설정된 결과를 표시한다. Fig. 13(e)는 111역 하선 진입 구간에 대한 열차를 생성하고, 111역 하선에서 111역 상선 승강장 진입 진로를 기반으로 해당 열차의 이동 권한이 생성된 지상 시물레이터 결과 화면이다.

Fig. 13을 통해, CBTC 기본 기능에서 111역 상선 진입 진로를 해제하고, 하선에서 상선 진입 진로를 설정하는 것이 가능하며, 차상 시물레이터에서 확인한 바와 같이 통신이 두절된 시험 열차 위치 (1107, 33.852m)가 해당 열차의 111역 하선에서 111역 상선 승강장 진입 경로에 존재하여 두 열차 간에 충돌 사고 가능성이 있으므로, 통신 두절 상황에서 운영 실수에 대해 시스템이 방호하는 한계가 있음을 확인할 수 있다.



(a)

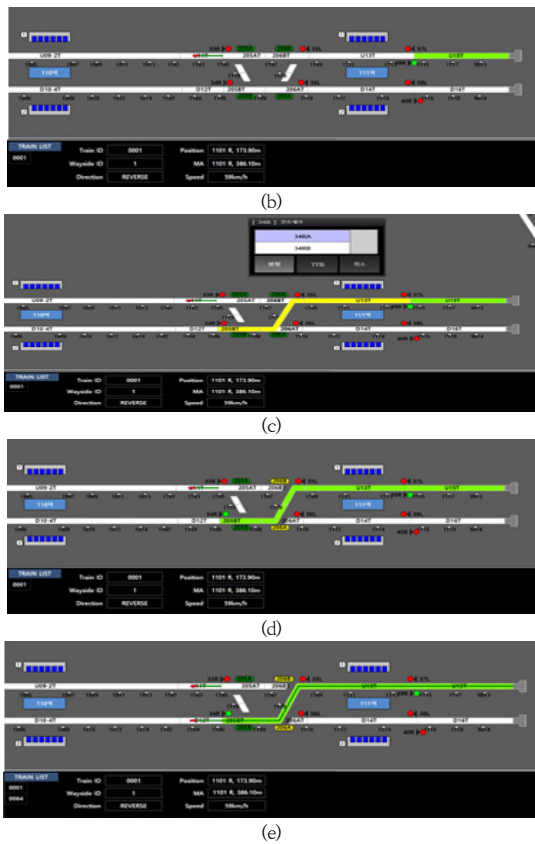


Fig. 13. Protection of operation by CBTC basic function in the first simulation; (a) Control to release entry route from up-line to up-line in 111 station (b) Route released (c) Control to set entry route from down-line to up-line in 111 station (d) Route set (e) Create a train for entering 111 station from down-line to up-line

Fig. 14는 제한된 이동 폐색 확장 방호 기능이 추가된 ATP 시스템에 의해 통신 두절에 대한 안전 방호가 강화된 결과를 보여준다. Fig. 14(a) 지상 시뮬레이터 화면은 통신 두절 시점부터 통신 두절 판단 시간까지 열차가 열차 성능 최고 속도로 이동(D_1)하여 이동 폐색 길이(D_{MB})가 (1101, 271.3m)로 결정된 결과이다. Fig. 14(b)는 D_1 이후부터 단위 시간 누적 이동(D_2)하여 이동 폐색 길이(D_{MB})가 (1101, 527.80m)로 이동 권한 길이(D_{MA})인 (1101, 527.80m)로 동일하게 된 결과 화면이다. Fig. 14(c)는 111역 상선 승강장 진입 진로 해정 제어 화면이며, Fig. 14(d)는 확장된 이동 폐색으로 인해 운영자에 의한 진로 해정 제어가 불가능하여 진로 설정 상태가 유지된 결과 화면이다.

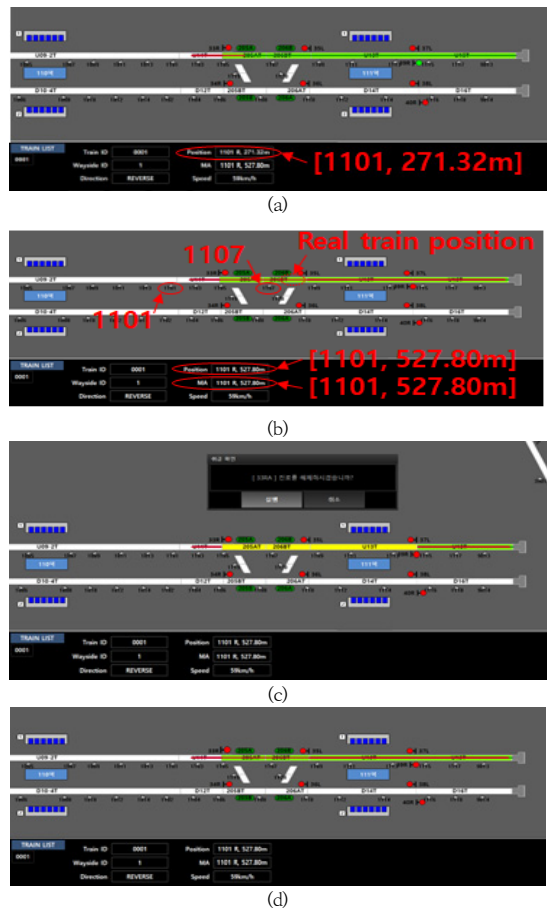


Fig. 14. Protection of operation by moving block extension in the first simulation; (a) D_1 in wayside simulator (b) D_2 in wayside simulator (c) Control to release entry route from up-line to up-line in 111 station (d) Route not released

두 번째 시나리오는 본선 승강장 측선 진입이며, 본선 101역을 대상으로 선정하였다. 통신 두절 시험 열차를 101역 상선에서 하선 승강장으로 이동시켜서 101역 하선 승강장 진입 진로 전에 무선 통신 두절을 발생시켜서 실제 열차가 진로를 진입하여 정차하도록 만든다. 실제 열차가 진로 상에 존재하지만, CBTC 기본 기능은 101역 하선 승강장 진입 진로가 해정 가능하여 운영에 의한 대항 열차 진입 시 사고 가능성이 있으며, 이동 폐색 확장 방호 기능이 추가된 ATP는 진로 해정이 불가능한 것을 확인하여 운영에 의한 사고를 예방할 수 있음을 확인한다.

Fig. 15는 시뮬레이터들의 초기 설정 화면이다. Fig.

15(a)는 열차 시뮬레이터에서 통신 두절 시험 열차를 생성한 결과 화면이며, Fig. 15(b) 지상 시뮬레이터 화면은 열차가 101역 상선 위치(201, 28.80m)에 생성된 결과이다.

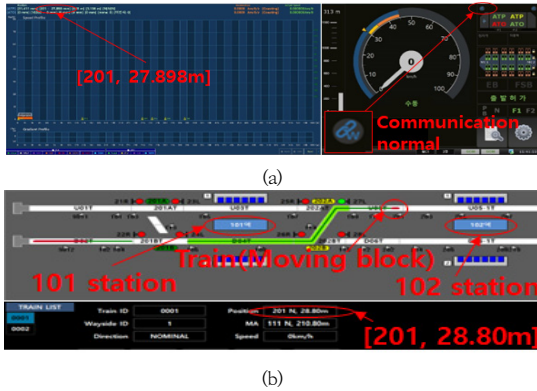


Fig. 15. Start in the second simulation; (a) Train simulator (b) Wayside simulator

Fig. 16은 무선 통신 두절 상황이다. Fig. 16(a)에서 열차 시뮬레이터는 지상 시뮬레이터 표시와 다르게 실제 열차 위치가 ATP에 의한 통신 두절 제동 체결로 101역 상선 진로 내의 위치(109, 17.800m)에서 정차하였음을 확인할 수 있다. Fig. 16(b) 지상 시뮬레이터 화면은 101역 상선에서 하선 승강장 진입 진로 전 위치(111, 106.20m)에서 21km/h 속도로 주행 중에 통신 두절의 결과이며, 통신 두절로 인해 열차의 정보가 수신되지 않으므로 열차가 속도가 있는 정지 상태로 표시된다.

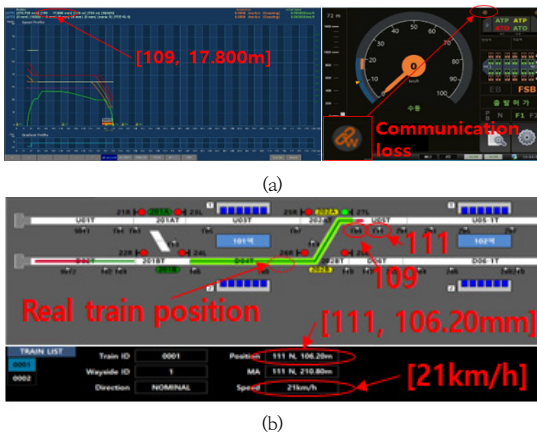


Fig. 16. Communication loss in the second simulation; (a) Train simulator (b) Wayside simulator

Fig. 17은 CBTC 기본 기능에서 통신 두절 시 운영 실수에 의한 사고 발생 가능성을 보여준다. Fig. 17(a) 지상 시뮬레이터 화면은 101역 상선에서 하선 승강장 진입 진로를 해제 제어하는 것이다. Fig. 17(b)는 지상 시뮬레이터가 무선 통신 두절로 데이터를 수신하지 못하여 실제 열차가 진로에 진입하여 정차한 상태이지만 진로 해제 제어가 실행된 결과를 보여준다. Fig. 17(c)는 101역 하선 회차선에 있는 대항 열차가 101역 하선 승강장으로 진입할 수 있는 진로를 설정하는 지상 시뮬레이터 화면이며, Fig. 17(d)는 101역 상선에서 하선 승강장 진입 진로가 해제되어서 101역 하선 회차선에서 하선 승강장 진입 진로가 설정된 결과 화면이다.

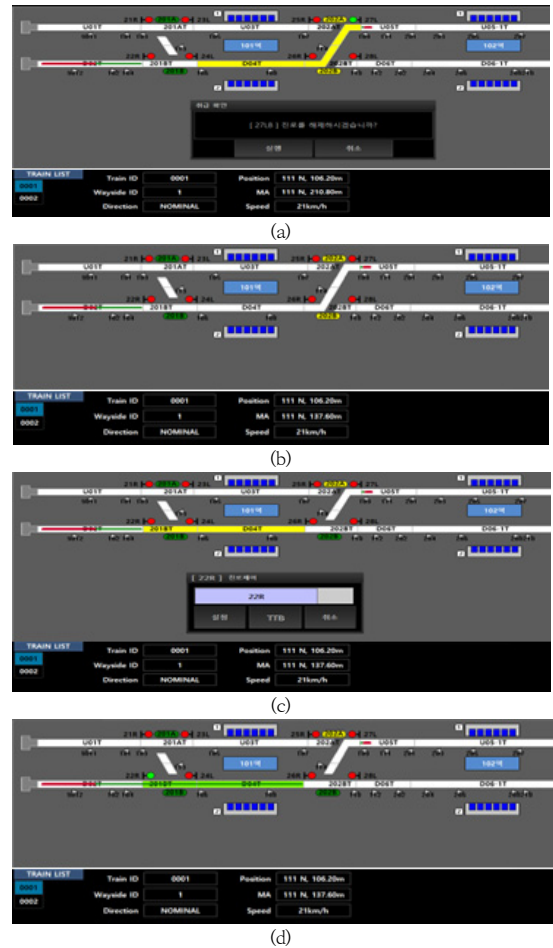


Fig. 17. Protection of operation by CBTC basic function in the second simulation; (a) Control to release entry route from up-line to down-line in 101 station (b) Route released (c) Control to set entry route from turnback-down-line to down-line in 111 station (d) Route set

CBTC 기본 기능에서 열차 시뮬레이터의 위치는 101역 상선에서 하선 승강장 진입 진로 내에 존재함에도 불구하고 운영에 의한 해당 진로 해정이 가능하며, 해당 진로의 대항 진로인 101역 하선 회차선에서 하선 승강장 진입 진로가 설정 가능한 것을 확인하였으며, 이는 무선 통신 두절 열차와 운영에 의한 대항 열차 간에 충돌 사고 발생 가능성이 있으며 더 높은 안전을 보장할 방법이 필요함을 보여준다.

Fig. 18은 제안된 이동 폐색 확장 보호 기능이 CBTC 기본 기능의 부족한 안전 보호를 보완하는 방법을 보여준다. Fig. 18(a)는 통신 두절 시점부터 통신 두절 판단 시간까지 열차가 이동(D_1)하여 이동 폐색 길이(D_{MB})가 (111, 210.80m)로 결정되었고, 이동 권한 길이(D_{MA})인 (111, 210.80m)로 동일하게 되어서 단위 시간 누적 이동(D_2) 없이 이동 폐색이 최대로 확장되었음을 보여준다. Fig. 18(b)에서 지상 시뮬레이터 화면은 운영자에 의한 101역 하선 승강장 진입 진로 해정 제어를 하는 것이며, Fig. 18(c)는 이동 폐색 확장으로 인해 해당 진로 해정 제어가 실행되지 않은 결과를 표시한다.

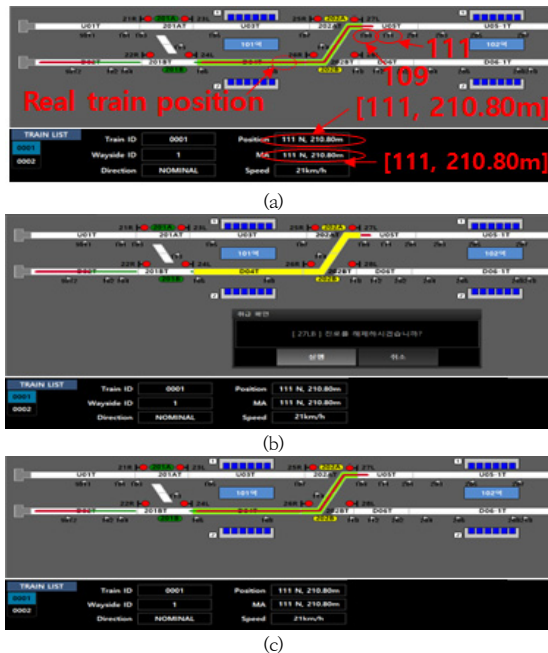


Fig. 18. Protection of operation by moving block extension in the second simulation; (a) $D_1 + D_2$ in wayside simulator (b) Control to release entry route from up-line to down-line in 101 station (c) Route not released

이동 폐색 확장 보호 기능은 실제 열차가 존재하는 위치를 포함하여 이동 폐색을 설정하므로 CBTC 기본 기능에서 운영 실수에 의한 진로 해정이 불가능하여 대항 열차에 의한 사고를 예방할 수 있음을 확인하였다.

세 번째 시나리오는 기지 유치선 출고이다. 무선 통신 두절 열차는 기지 유치선 3번에 생성하고 출고해서 입출고검사대 진입 방향으로 이동하며, 유치선 3번에서 입출고검사대 진입 진로 직전에 통신 두절을 발생 시킨다. 대항 열차는 기지 유치선 2번에서 출고해서 입출고검사대 진입 방향으로 생성한다.

Fig. 19는 시뮬레이션 초기 설정 화면이다. Fig. 19(a)와 같이 차상 시뮬레이터를 통해서 통신 두절 시험 열차를 생성한다. Fig. 19(b) 지상 시뮬레이터 화면을 통해 통신 두절 시험 열차가 유치선 3번 위치(3924, 10.40m)에 생성되었고, 해당 열차가 입출고검사대로 진입할 수 있는 진로가 설정되었으며, 대항 열차는 유치선 4번 위치에 생성하였음을 확인한다.

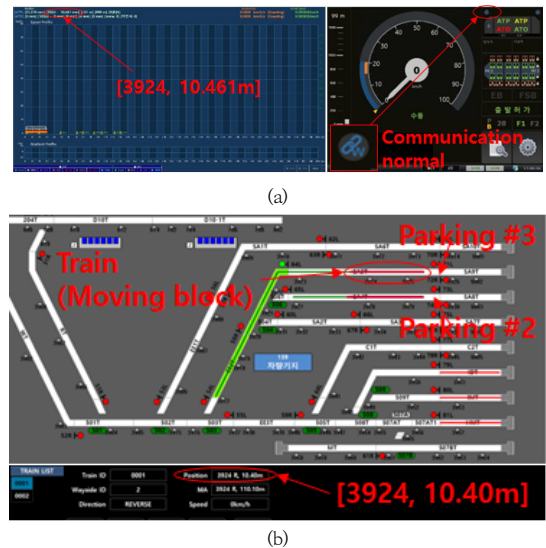


Fig. 19. Start in the third simulation; (a) Train simulator (b) Wayside simulator

Fig. 20은 무선 통신 두절로 인한 차상 시뮬레이터의 실제 열차 위치와 지상 시뮬레이터가 인지하는 선로와 열차 상태를 보여준다. Fig. 20(a)는 열차 시뮬레이터가 ATP에 의한 통신 두절 안전측 제동 체결로 입출고검사선 진입 진로로 진입하여 진로 내의 위치(3923, 15.896m)에서 정차한 상태임이 보여준다. Fig. 20(b)는 지상 시뮬레이터 화면으로 통신 두절 열차가 유치선 3번에서 입출

고검사선으로 이동 중에 입출고검사선 진입 진로 전 위치(3924, 25.80m)에서 14km/h 속도로 주행 중 통신 두절을 두절 시킨 결과를 확인할 수 있다. 통신 두절 이후 지상 ATP 장치가 차상 ATP 장치로부터 열차 정보를 수신하지 못하여서 가장 마지막으로 수신한 상태인 열차가 속도가 있는 상태로 입출고검사대 진입 진로 전에 위치에서 이동하지 않는 상황이다.

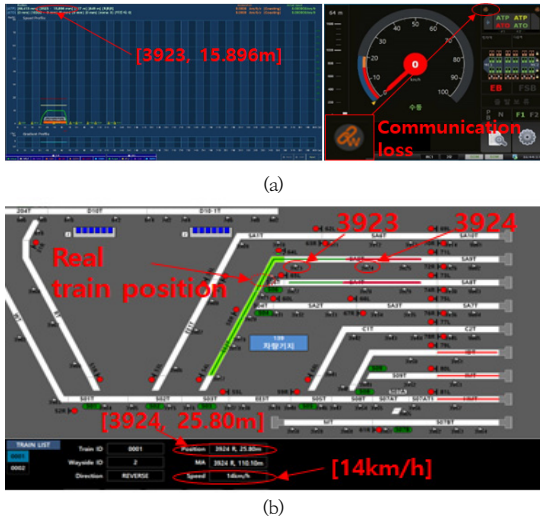


Fig. 20. Communication loss in the third simulation; (a) Train simulator (b) Wayside simulator

Fig. 21은 CBTC 기본 기능일 때, 기지 유치선에서 출고하기 위한 운영에서 사고 발생 가능성이 있음을 보여준다. Fig. 21(a)는 지상 시뮬레이터에서 입출고검사선 진입 진로를 해정 제어하는 화면이다. Fig. 21(b)는 해당 진로가 해정된 결과이다. 실제 열차는 입출고검사대 진입 진로 전에 통신이 두절되어 해당 진로에 진입하고 더 나아간 위치에 존재하지만, 지상 ATP 장치가 열차의 이동 폐색을 해당 진로 진입 전 위치로 인지하고 있으므로, 관제 ATS 장치의 해당 진로 해정 제어가 전자 연동 장치의 안전측 연계를 통해 수용된 결과이다. Fig. 21(c)는 지상 시뮬레이터를 통해 유치선 2번에서 입출고검사대로 진입하는 진로를 설정 제어하는 화면이며, Fig. 21(d)는 해당 진로가 설정된 결과 화면이다. 실제 열차가 유치선 2번에서 입출고검사대로 진입하는 진로 상에 존재하므로 해당 진로가 설정되지 않아야 하지만 CBTC 기본 기능으로는 해당 사실을 인지할 방법이 없으므로 해당 상황에서 운영 실수로 Fig. 21과 같이 통신 두절된 열차가 존재할 때, 기지 유치선 진로를 해정 및 설정할 경

우 대항 열차와의 추돌 사고 가능성이 존재한다.

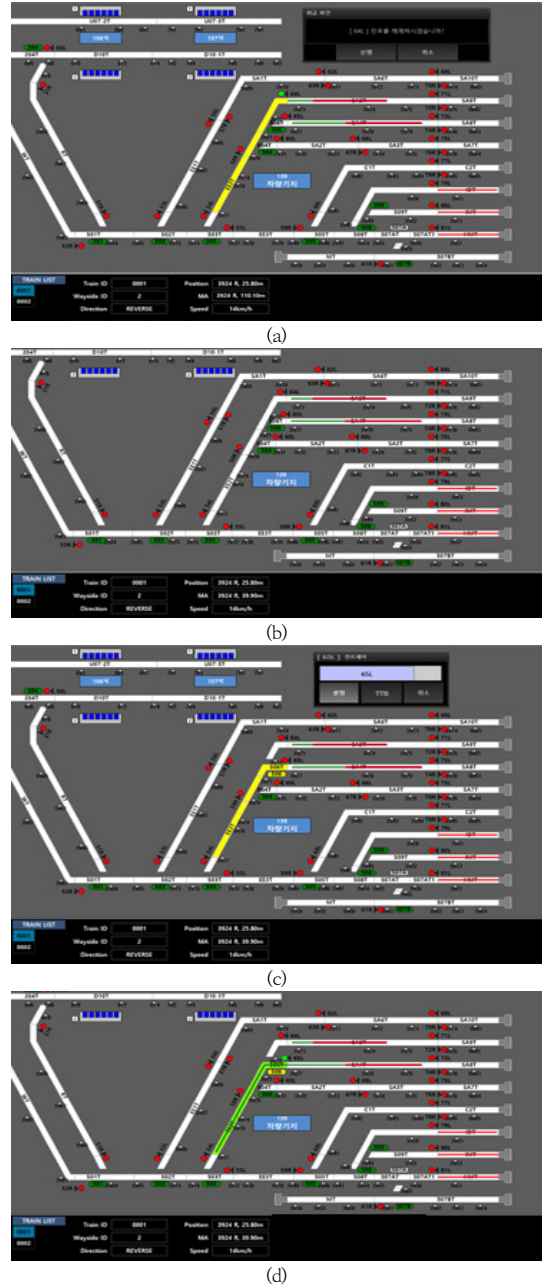
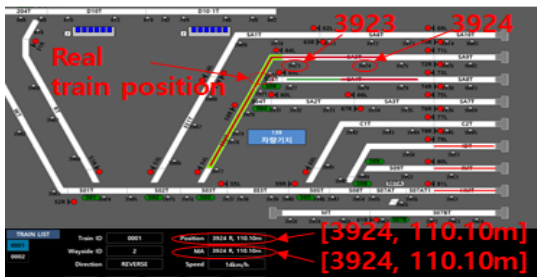


Fig. 21. Protection of operation by CBTC basic function in the third simulation; (a) Control to release entry route from parking #3 to entry/exit inspection line (b) Route released (c) Control to set entry route from parking #2 to entry/exit inspection line (d) Route set

Fig. 22는 이전 시나리오와 마찬가지로 이동 폐색 확장 기능이 CBTC 기본 기능의 안전을 보완하는 방법임을 보여준다. Fig. 22(a)는 통신 두절 시점부터 통신 두절 판단 시간까지 열차가 최대 속도로 이동(D_1)하여 이동 폐색 길이(D_{MB})가 이동 권한 길이(D_{MA})와 동일하게 (3924, 110.10m)로 결정된 것을 보여준다. Fig. 22(b)와 Fig. 22(c)를 통해, 이동 폐색 확장으로 인해 입출고검사선 진입 진로가 해제 불가능하게 되므로 CBTC 기본 기능에서의 운영 실수를 예방할 수 있음을 확인할 수 있다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 22. Protection of operation by moving block extension in the third simulation protection: (a) D_1+D_2 in wayside simulator (b) Control to release entry route from parking #3 to entry/exit inspection line (c) Route not released

5. 결론

본 논문에서 CBTC 시스템에서 무선통신이 두절 되었을 때 기본 기능으로 방호하는 것의 한계를 설명하고, 그것을 보완하기 위한 방법으로 이동 폐색 확장 방호 기능을 추가할 것을 제안하였다. 제안된 방법을 확인하기 위해 KTCS-M 표준에 기반하여 구축된 시스템들과 실제 운영 노선인 신림경전철의 선로 구성으로 시뮬레이션 하였으며, 철도 운영 노선을 대표할 수 있는 본선 승강장 진입, 본선 승강장 측선 진입, 기지 유치선 출고의 3가지 환경으로 시험을 한 결과, 이동 폐색 확장 방호 기능이 CBTC 시스템을 더 안전하게 사용할 수 있는 방법임을 확인하였다. 이동 폐색 확장 방호 기능을 KTCS-M 표준에 반영하여 시스템 안전성을 높이기를 기대한다.

향후 안전성이 확보되면서 더 효율적인 작은 방호 공간을 확보하기 위해서는, 최대 가속도와 감속도를 이용하여 통신 두절 시점의 열차 위치와 열차 속도를 기반으로 최소한의 이동 폐색 확장 방호 길이를 결정하는 방법에 대한 연구를 진행할 계획이다. 또한 핸드오버 상황에서 이동 폐색 확장 기능의 영향력 분석 등의 추가적인 연구를 진행할 계획이다.

References

- [1] IEEE std 1474.1 (2004) IEEE Standard for Communications-Based Train Control(CBTC) Performance and Functional Requirements.
- [2] KRS SG 0069-15. Korean Radio based Train Control System for urban rapid transit. Korean Railway Standards.
- [3] Farooq, J. (2017). Performance Analysis and Evaluation of Advanced Designs for Radio Communication Systems for Communications-Based Train Control (CBTC).
- [4] Shi, J. (2016, September). Research on CBTC Function of Train Control System. In 2nd International Conference on Electronics, Network and Computer Engineering (ICENCE 2016) (pp. 64-70). Atlantis Press.
- [5] Okan, Muhammet Raşit. Estimation of train position in case of communication failures: A moving block case study. MS thesis. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [6] Seh-Chan Oh, & Young-Ju Kim (2022). Improved ATP Handover for Radio-based Train Control System. Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, 23(12), 494-504, DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2022.23.12.494>
- [7] Seungho Choi. 2020. Study on the continuous operation

- method in the event of onboard signal system communication failure of driverless train. Master's thesis. Ajou university.
- [8] Mera, J. M., Gómez-Rey, I., & Rodrigo, E. (2010). CBTC test simulation bench. WIT Transactions on The Built Environment, 114, 485-495.
- [9] Quan, Z. H., Choi, S. A., Choi, D. H., Cho, C. H., Park, G. S., & Ryou, M. S. (2011, September). Modeling for CBTC car-borne ATP/ATO functions and its applications. In SICE Annual Conference 2011 (pp. 1929-1932). IEEE.
- [10] Chen, R. W., & Guo, J. (2010). Development of the new CBTC system simulation and performance analysis. WIT Transactions on the Built Environment, 114, 497-507.
- [11] Jin-Seok Kang, Duk-Won Kang, & Seong-Ho Park (2018). A Study on responses for communication failure between wayside and onboard in CBTC. 2018 spring conference of the korean society for railway.
- [12] Joo Hee Don, Jun Hyoung Park, Jin Song Yang, Kyung Su Ryu, Seung Min Jang, & Jung Soo Park (2018). A Study on the history and development of Railway radio communication. 2018 autumn conference of the korean society for railway.
- [13] Yu-Suk Sung, Jong-Hyen Baek, Doh-Chul Yang, & Chul-Hong Park (2015). Interference Analysis for Reliable Wireless Communication of On-Board Oriented Train Control System. 2015 spring conference of the korean society for railway.
- [14] Yong-Kyu Kim, Yong-Ki Yoon, Jung-Tai Kim, Kyeong-Jun Ko, & Yong-Soo Song (2021). Study on Technical Characteristics of Unattended Automation Train Control System. Journal of the Korean Society for Railway, 24(1), 87-100, DOI: <https://doi.org/10.7782/JKSR.2021.24.1.87>
- [15] Hyoung-Hoon Kim, Chan-Seok Yang, Yong-Gee Cho. (2011). A Study on Mixed Usage of Logical Block and Moving Block in CBTC System. 2011 autumn conference of the korean society for railway, pp. 2726-2730.
- [16] Hyoung-Hoon Kim. 2020. A study on the principle of logical block sectioning in CBTC systems, Master's thesis, Seoul national university science & technology.
- [17] Basile, D., ter Beek, M. H., Ferrari, A., & Legay, A. (2022). Exploring the ERTMS/ETCS full moving block specification: an experience with formal methods. International Journal on Software Tools for Technology Transfer, 24(3), 351-370.
- [18] Leuschel, M., & Nayeri, N. (2023, September). Modelling, Visualisation and Proof of an ETCS Level 3 Moving Block System. In International Conference on Reliability, Safety, and Security of Railway Systems (pp. 193-210). Cham: Springer Nature Switzerland.
- [19] Marrone, S., Flammini, F., Janssen, B., Saddem-Yagoubi, R., Beugin, J., Ghazel, M., ... & Vittorini, V. (2023). Deliverable D2. 2-Moving Block Specification Development (Doctoral dissertation, Consorzio interuniversitario nazionale per l'informatica).
- [20] Kochan, A., & Koper, E. (2019, June). Mathematical model of the movement authority in the ERTMS/ETCS system. In International Scientific Conference Transport of the 21st Century (pp. 215-224). Cham: Springer International Publishing.
- [21] Yong-Ki Yoon, She-Chan Oh, June-Young Choi, Jae-Young Park, & Hai-Won Yang (2012). Development of ATP Train Separation Control Simulator for Radio-based Train Control System. Journal of the Korean Society for Railway, 15(1), 29-36.
- [22] Zhao, X. Tang, T. & Yan, F. (2009, April). A functional safety analysis approach for analyzing CBTC system. In 2009 international conference on measuring technology and mechatronics automation (Vol. 3, pp. 737-741). IEEE.

김 형 훈(Hyung-Hoon Kim)

[정회원]



- 2003년 2월 : 인하대학교 컴퓨터 공학과 (컴퓨터공학학사)
- 2020년 2월 : 서울과학기술대학교 철도전기신호공학과 (철도전기신호공학석사)
- 2003년 3월 ~ 현재 : LS Electric 철도엔지니어링 매니저

<관심분야>

철도전기, 철도신호

이 중 우(Jong-Woo Lee)

[정회원]



- 1983년 2월 : 한양대학교 기계공학과 (공학학사)
- 1986년 2월 : 프랑스 낭트 중앙대학교 제어공학과 (공학석사)
- 1993년 2월 : 프랑스 파리 University de Paris IV 전자공학과 (공학박사)
- 2005년 3월 ~ 현재 : 서울과학기술대학교 철도대학원 철도전기신호공학과 교수

<관심분야>

철도전기, 철도신호